

УДК 621.9.06.-259.001.2

**И.П. КОНОВАЛОВ**, Одесса, Украина

## **СТРУКТУРА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ОПЕРАЦИЙ РЕЗКИ ЛИСТА - ЯДРО МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ САПР РАСКРОЯ**

У статті розглянуті питання проектування карт Розкрою, як основної складової частини ефективної технологічної підготовки для обладнання з ЧПУ плазмового, лазерного, кисневого, гідроабразивного різання та різання на гільйотинних ножицях. Проаналізовано тенденції в становленні та розвитку автоматизованих засобів програмування обладнання даного класу. Вивчено та узагальнено методи ефективної побудови технологічного процесу (ТП) з урахуванням організаційних і технологічних обмежень обладнання. Виявлено та обґрунтовано необхідність ув'язування принципів побудови САПР з точною моделлю ТП. Сформульована і побудована багаторівнева математична модель, покладена в основу побудови САПР.

**Ключові слова:** проектування карт розкрою, технологічна підготовка

В статье рассмотрены вопросы проектирования карт Раскроя, как основной составляющей части эффективной технологической подготовки для оборудования с ЧПУ плазменной, лазерной, кислородной, гидроабразивной резки. Проанализированы тенденции в становлении и развитии автоматизированных средств программирования оборудования данного класса. Изучены и обобщены методы эффективного построения технологических процессов (ТП) с учетом организационных и технологических ограничений оборудования. Выявлена и обоснована необходимость увязки принципов построения САПР с точной моделью ТП. Сформулирована и построена многоуровневая математическая модель, положенная в основу построения САПР.

**Ключевые слова:** проектирование карт раскроя, технологическая подготовка

The paper deals with the design nesting, as the main component part of an effective technological preparation for the CNC machines for plasma, laser, oxyfuel, and waterjet cutting and cutting on guillotine shears. The trends in the development of automated programming equipment of this class. Studying and generalizing methods of effective production process (PP), taking into account the organizational and technological constraints of the equipment. Spotted and the necessity of linking the principles of building CAM model with the exact PP. Formulated and built a multi-level mathematical model underlying the construction of CAM.

**Keywords:** design nesting, technological preparation

### **Введение**

Заготовительный передел производства, связанный с резкой фигурных деталей из плоского листа (назовем листообработка для дальнейшего изложения), является предметом интереса многих специалистов:

- конструкторов оборудования и СЧПУ для резки листа
- проектировщиков инструментов для высокопроизводительной и высокоточной плазменной, газовой, плазменной и гидроабразивной резки
- технологов, проектирующих ТП, технологические операции (ТО), карты раскроя (КР) и управляющие программы (УП) обработки.

### **Структура и тенденции развития листообработки**

Внимание к этой области не случайно. За последние 30 лет ее относительная доля в объеме производства на машиностроительных предприятиях устойчиво растет. В некоторых случаях может превышать 50% барьер.

К листообработке можно отнести технологические процессы формирования фигурных или прямоугольных заготовок из плоских листов. Оборудование для них разделяется на три основных класса: компоновки роутер (портальные машины и листовые процессоры), координатно-пробивные прессы и ножницы. Общим для них является возможность групповой обработки множества заготовок из одного листа.

Класс «роутерной» компоновки представляет оборудование, имеющее стол, портал, движущийся вдоль него, с находящимися на нем одним или несколькими суппортами. Оснащаются газовыми, плазменными и лазерными режущими головками, а так же инструментами для резки водной струей. Это разнообразное оборудование объединяется в одну группу за счет нескольких общих свойств. Таких как применение методов резки, не передающих значительных усилий резания на компоненты станка в процессе обработки и осуществление типового цикла обработки: холостой переход к месту обработки, пробивка листа, обработка контура.

Развитие данной группы оборудования привело к появлению нескольких направлений. Таких как много - инструментальная параллельная обработка для газовой, плазменной резки; многоходовая 3D обработки по снятию фасок (BEVEL); применение высокоточных плазменных инструментов, позволяющих выполнять резку с параметрами точности и шероховатости, приближающимися к механообработке; концентрация операций на одном станке. Последнее обстоятельство фактически превращает оборудование в многоцелевой центр. Например, в случае использования на одном портале плазменного, газового, маркировочного суппортов, сверлильной головки.

В дальнейшем изложении основное внимание будет уделено анализу возможностей и построению ТП именно для этой группы оборудования.

### **САПР в листообработке. Тенденции развития**

Суть проектирования ТО листообработки состоит в создании плана размещения деталей на листе и расчета траекторий обработки, в которых определяются точки пробивки листа резакон, направления обхода контуров, и др.

Оборудование с ЧПУ требует предварительной подготовки УП, содержащей точные координаты движений и подробные инструкции по управлению резкой. Существуют три способа формирования УП: ручной, формирование УП по ходу обработки используя макро описания и другие возможности СЧПУ, и при помощи специализированного программного

обеспечения (ПО) САПР. Первый и второй способы применимы только в простейших случаях, на производстве практически не используются.

Для создания УП резки Карт Раскроя существует множество ПО, выполненного различными разработчиками в разное время. Постоянно продолжают появляться новые системы, что свидетельствует об интересе и динамическом развитии этой области. Рассматривая и сравнивая программные продукты можно отметить, что существуют большие различия в реализованном функционале и возможностях, предоставляемые каждым ПО для пользователя – технолога. Но главные отличия находятся в «классе», к которому можно отнести ПО.

Условно можно выделить три класса: САП, NEST, САПР РАСКРОЙ.

САП – система автоматизированного программирования. Родоначальником этих систем является АРТ, появившийся в 1960-70х годах. На языке, приближенном к естественному, пользователь описывает линии, дуги, точки контуров обработки заготовок. В нужных местах вставляет технологические команды. Система автоматически рассчитывает координаты опорных точек и получившуюся траекторию трансформирует в коды СЧПУ. Для преобразования траектории в коды СЧПУ, в АРТ был использован специальный модуль, который назван Постпроцессор. Это ключевое понятие и сегодня используется в САПР. Для унификации разработки Постпроцессоров было предложено имеющуюся траекторию приводить к стандартному виду, названному CLDATA. Такая схема применялась к разным станкам. От токарных до фрезерных и плазменных. Множество современных последователей АРТ-а внешне существенно отличаются от своего основателя: производительная графика, диалоговое построение траекторий, развитая система удобного меню, использование DXF формата. Но принцип остался старый, на входе готовая геометрия и технология, на выходе то же самое, но на языке СЧПУ.

NEST – системы САП, дополненные модулем размещения. Так как в задачу построения УП для карты раскроя входит трудоемкий процесс раскладки, очевидно, что потребовалась автоматизация решения задачи размещения заготовок на листе. Для этой цели идеология САП была расширена модулями NEST, выполняющими ручное или автоматизированное решение процесса размещения фигурных объектов. Но тесной связи, особенно в первых реализациях, между САП и NEST не предусматривалось. Тогда казалось, что такая связь не особенно нужна. Типовые реализации строятся на базе модульного принципа, где система представляет собой набор модулей, вызываемых при необходимости. Характерно, что в системах класса NEST модульность является неотъемлемой частью концепции.

САПР РАСКРОЙ – комплексные системы, основанные на моделях, которые изначально предназначены для проектирования технологии на базе структуры ТП и технологической операции (ТО). Рассчитаны потенциально

на весь возможный круг задач, который может встретиться технологу на производстве. Модульность в таких системах так же присутствует, но только на уровне реализации, а не концепции. Уровень автоматизации высок. Можно говорить о наличии «технологического» интеллекта. Имеются возможности предоставления развитых средств коммуникации с организационным ПО «верхнего уровня».

Приведенная классификация условна. Существующая САПР, относящаяся к одному классу, может иметь ряд свойств, присущих другому. Сравнительный анализ приведенных классов ПО для создания карт Раскроя, позволяет отметить достоинства и недостатки разных САПР и обратить внимание на следующее:

1. Каждый класс ПО на выходе получает одно и то же – УП. То есть с точки зрения результата они одинаковы. В условиях производства может использоваться любое ПО, вне зависимости от принадлежности к классу.

2. ПО класса САП наиболее доступно и универсально. Но не годится для автоматической интеграции с ПО верхнего уровня, т.к. не использует базовые технологические понятия и имеет высокую трудоемкость проектирования.

3. В ПО класса NEST могут быть представлены разные модули для решения одной и той же задачи. Например, модуль построения траектории для плазмы, модуль построения траектории для лазера. Таким образом, путем накопления вновь создаваемых модулей, ПО оперирует технологическими знаниями. Универсальность ограничена. Высокий уровень автоматизации возможен, но присутствуют трудности его предоставления. Логическая сложность.

4. ПО класса РАСКРОЙ предоставляет наибольший уровень автоматизации, есть элементы технологических знаний и технологического интеллекта. Так как ПО ориентировано на концепции технологического процесса, как правило, предоставляется единый модуль для решения базовых задач. Например, единый модуль расчета траекторий. Учет особенностей газовой или плазменной резки выполняется в параметрах его работы. Обеспечивает высокую автоматизацию, возможности интеграции с системами верхнего уровня, предоставляет данные, обеспечивающие командные способы работы.

Представляется разумным следующий вывод: в современных условиях в виду высокой востребованности выполнения качественной и быстрой технологической подготовки производства (ТПП) по созданию карт Раскроя, наиболее рациональной является рекомендация широкого использования и разработки специализированного ПО, относящегося к классу САПР РАСКРОЙ.

Таблица 1

Классы	Автоматизация геометрии	Постпроцессор	Раскладка	Технологические знания	Технологический интеллект	Автоматизация	Относительная стоимость
САП	+	+	-	-	-	-	Низкая
NEST	+	+	+	+	-	Средняя	Средняя
САПР Раскрой	+	+	+	+	+	Высокая	Высокая

### Постановка задачи

Задачей исследования, освещаемого в статье, является:

- выявление технологических особенностей построения карт Раскроя и построение структуры ТО, необходимой для создания УП
- построение модели, отображающей структуру ТО и использование ее в основе математического обеспечения (МО) САПР РАСКРОЙ.

### Построение структуры САПР РАСКРОЙ

Систематизация технологических приемов резки приводит к выявлению структурных составляющих технологических операций и их взаимосвязи. Позволяет построить структуру самой операции и ее отображения - карты раскроя.

Структура операции фигурного раскроя определяет состав необходимых подзадач САПР, их иерархические зависимости, управление порядком их вызова, требуемый для этого интерфейс пользователя, входные и выходные данные для каждой подзадачи, хранилище для накопления промежуточной информации, способы ее представления и методы доступа к ней.

Оговоримся, что пристальное внимание далее будет уделяться только операциям, выполняемым на портальном оборудовании для резки. Несомненно, что в полном ТП присутствуют многие другие операции, начиная от правки, и до транспортировки.

Листообработка является частным случаем машиностроительного производства. Соответственно, к ней применимо требование строить ТП в рамках общеизвестной структуры. Классическая структура ТП способна описать упорядоченный перечень операций, а так же подробное содержимое каждой из них, детализированное до уровня элементарного движения станка – перехода (рис. 1). Все рисунки используют упрощенную нотацию UML, в частности, символы \* и 0..1 для обозначения допустимых повторений объектов структуры.

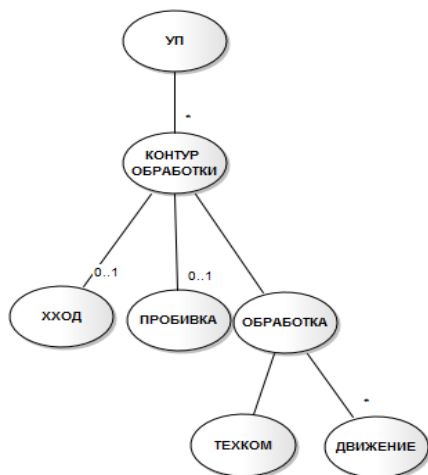


Рисунок 1

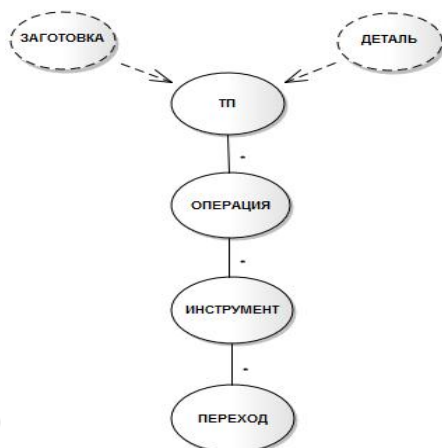


Рисунок 2

На этом этапе необходимо уточнить понятие УП для определения ее соответствия категориям ТП. УП это последовательность элементарных команд, которые может выполнить станок: команды движения по линии или дуге, команды начала и завершения резки. На принципиальном уровне это практически полный перечень. Можно сказать, что это формат “асемблера” или машинные коды для станка с ЧПУ. “Машинная” структура УП (рис. 2) показывает, что логический уровень УП можно трактовать как соответствие многоцелевой операции, равной последовательности элементарных операций для каждого контура. Обратим внимание, что произошло первое расширение структуры. Теперь операция трактуется как последовательность резки контуров. Именно эта структура лежит в основе простейшего ПО класса САП. Такой подход не раскрывает сведения о существе построения

траектории внутри операции, и о мотивах разделения операции на последовательность контуров обработки.



Рисунок 3



Рисунок 4

Одна из очевидных особенностей ТП Раскроя - группирование деталей для их одновременной вырезки из листа. Это обстоятельство требует появления нового объекта структуры. Необходим перечень, где будут указаны места, в которых можно расположить детали с учетом углового положения. Наиболее простым решением представляется появление в структуре ТО нового объекта – Раскладка (рис. 3), состоящей из множества размещенных деталей, каждая из которых определяет контура обработки, а значит возможность построения «машинных» команд УП. Это вполне жизнеспособный подход. Следуя ему, мы получим ПО класса NEST ранней сборки.

Чем же может не устраивать в таком подходе? Схема ТП в соответствии с этим на принципиальном уровне выглядит так: есть лист и детали, которые нужно получить. Термин детали далее означает заготовки из листа, которые необходимо получить. Раскладываем детали на листе с условием не пересечения, а затем для каждой из них строим траектории, которые соединяем маршрутом холостых ходов. Выглядит вполне логично. Однако здесь не учитывается Технология. Ведь в структуре ТП пока нет никаких

сведений о вариантах технологического исполнения операций, и о соответствии выбранному инструменту. А это напрямую влияет на процесс размещения. Ведь мы размещаем не исходную деталь. Необходимо найти ответ на вопрос: что же мы размещаем на листе? Назовем этот объект – Претендент. (рис. 4).

Создание раскладки является соединением двух процессов: технологического и геометрического. В технологическом – определяем факт появления нового Претендента на размещение, вычисляем форму и размеры его оболочки. В геометрическом – располагаем на листе готовую оболочку. Число потенциальных Претендентов существенно больше исходных деталей, так как имеется возможность объединять друг с другом экземпляры деталей, применяя к ним разнообразные технологии обработки. Форма и размеры оболочки для разных Претендентов порожденных одними и теми же исходными деталями будет существенно различаться в зависимости от примененной технологии.

Приведем некоторые примеры технологических факторов, влияющих на формирование геометрии оболочки. Каждый тип резки характеризуется своим «диаметром» инструмента, который варьируется от 0.1 мм для лазерных, до 10 мм для газовой резки. И многообразие режимов пробивки: длиной подхода к контуру, диаметром расплескивания металла, и др. Эти элементы являются частью формы оболочки. Для случая учета эффекта от процесса коробления – необходимо размещать длинные поверхности деталей подальше друг от друга и прерывать рез перемычками. Размер оболочки в должен быть увеличен. В другом случае, когда коробление не опасно, можно приблизить друг к другу те же длинные поверхности и обработать смежные поверхности деталей единым резом. Соответственно, оболочка уменьшится.

Обобщение выглядит так: Размещаются не детали, а некоторые объекты (Претенденты), порожденные исходными деталями или уже созданными Претендентами путем добавления требований технологии, и вычисления соответствующей этому объединению геометрии. Их число заранее неизвестно. Процесс создания может быть рекурсивным. Как правило, существенно зависит от опыта и фантазии проектировщика. Заранее неизвестно будут ли использованы все созданные Претенденты.

На уровне САПР геометрический и технологические процессы протекают не всегда последовательно. Для них можно использовать термин «слабо» зависимы. Например, геометрия может зависеть только от некоторых параметров технологии. Эти параметры назовем ключевыми, т.к. изменения в них приведут к изменению геометрической оболочки. Наиболее яркий пример – положение точки пробивки, при раскладке одинаковых прямоугольников. Если ее одинаково зафиксировать для всех деталей, мы не достигнем плотного размещения. Но если ее вычислять по ходу геометрического размещения, получаем плотное размещение и множество



разных положений пробивки относительно детали. Другим примером, иллюстрирующим связь технологии и геометрии размещения, является зависимость расчета направления обхода траектории от места размещения детали. В основе этого случая лежит анализ уменьшения жесткости листа по мере обработки детали. В некоторых случаях направление обхода контура принимает разные значения в зависимости от места размещения детали на листе.

Приходим к выводу, что в структуре ТО необходимо ввести понятие логического уровня, содержащего технологический и геометрический контексты, которые слабо связаны друг с другом, могут иметь различную последовательность взаимного выполнения, прерываться для перехода от одного к другому и возвращаться обратно. (рис. 5).

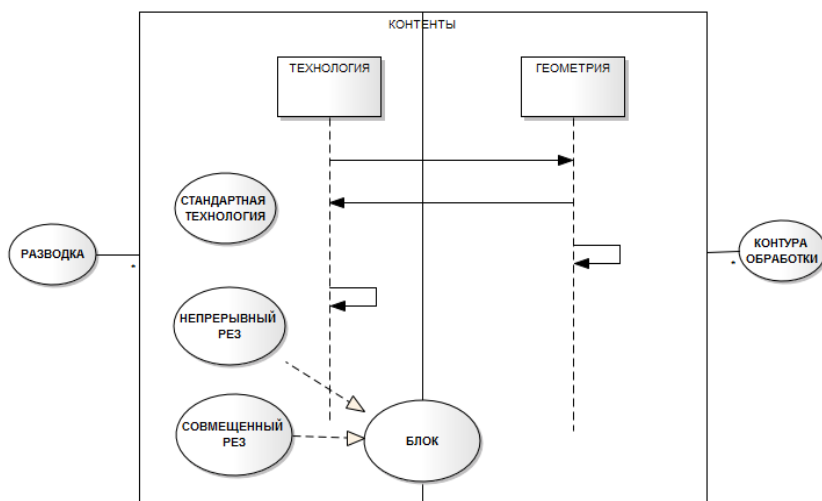


Рисунок 5

Остается решение еще одного вопроса – обеспечение пользователя технолога средствами управления процессом проектирования. Для этого предлагается использование стандартных, привычных для любого проектировщика, категорий, определяющих суть действий по составлению карты раскроя. Ими являются расчеты Размещения, Траекторий, Маршрута. Эти действия составляют еще одни логический уровень структуры ТО. Являются «строительными блоками» задач, которые легко узнаются в пользовательском интерфейсе ПО. При этом мы понимаем, что

перечисленная последовательность является не более чем иллюстрацией направления стратегического продвижения процесса проектирования карты раскроя. Структурные элементы этого уровня должны не фиксировать какой-либо жесткий порядок выполнения проектирования, и не противоречить другим уровням структуры (рис. 6).

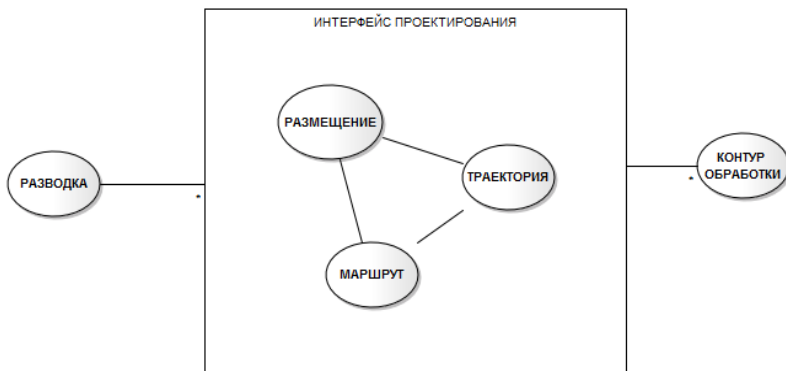


Рисунок 6

Групповая обработка деталей на листе подразумевает, что входной информацией для ПО является список деталей, упорядоченный по используемому типу материала, являющийся результатом работы планового отдела предприятия. Обычно применяемый термин – Заказ. Однако, для создания эффективного ТП, необходимо выполнить тактическое планирование, которое зависит от номенклатуры применяемого оборудования и наличия доступных заготовок-листов. Такое планирование можно осуществить только в рамках технологического подразделения. Результатом чего является появление новых структурных элементов: технологическое Задание и Фрагмент. Суть структуры этих элементов – в предоставлении разделения глобального заказа на части, доступные в одно время, на одном типе оборудования с учетом его пропускной способности и загрузки.

Элемент структуры, описывающий постпроцессор или генератор УП является выходным звеном как и в первых реализациях ПО. Однако в основе его работы используются более современные концепции. Первое – стандарт промежуточного языка для универсального описания УП. Предполагается наиболее логичным использование языка, категории и атрибуты которого полностью соответствуют структуре ТП и ТО. А в качестве средства представления и реализации стандарт XML.

### **Математическое обеспечение САПР**

Основное назначение структуры ТП и ТО – создать основу для построения МО. МО представляет собой точную модель ПО, в виде структур данных, перечней задач, алгоритмов их решения, методов их реализации, достаточную для создания экземпляра ПО. Исследуя структуру, мы получаем перечень задач, которые необходимо решить в рамках САПР Раскрой. Влияние структуры операции проявляется на всех этапах проектирования САПР — от определения состав подзадач и управления порядком их вызова, до установления иерархических зависимостей между ними. От способов накопления промежуточной информации до требуемого интерфейса пользователя.

Структура определяет план построения пользовательского интерфейса, учитывающий присутствие требуемых окон и допустимую последовательность их смены.

Для каждого узла структуры формулируем описание входных и выходных данных. Например, структурный уровень «Раскладка» можно представить, как множество размещенных объектов и узнать их атрибуты. А для задачи построения маршрута увидеть ряд технологических требований, без которых геометрическая реализация теряет смысл. Для узлов, имеющих входные и выходные данные, сформулировать алгоритм и его частные случаи, вытекающие из подробных свойств элемента структуры. На примере построения маршрута, наличие вложенного размещения требует начинать обработку с внутренней детали и далее, переходить к другим вложенным, даже если это противоречит кратчайшему пути. Решение находится путем дальнейшей классификации: претенденты распределяются на подгруппы, обладающие одинаковыми свойствами. И уже для каждой подгруппы вызывать соответствующий алгоритм.

Построенная структура позволяет разделить глобальные задачи на множество подзадач, существование которых полностью определяется технологическими требованиями. К каждой из них применяется поиск существующего алгоритма. Или формулируется постановка модифицированного алгоритма, учитывающего технологические ограничения. В качестве примера можно привести модуль построения траектории совмещенного реза. На первый взгляд, для решения этой задачи подходит идея использования свойств Эйлера графа. Это так. Но технология снова диктует свои ограничения. Даже в простейшем случае для обработки двух касающихся прямоугольников можно предложить несколько решений. В одном случае предпочтительней будет схема с начальным совмещенным движением, а в другом – классическая «восьмерка». На помощь снова приходит структура, именно она позволяет разделить эти задачи, выявить технологические ограничения, предъявить требования к алгоритмам, обозначить их место в системе.

Изложенные принципы использованы при построении систем автоматизированного построения раскрой «Интех-Р» и «Интех-Раскрой».

**Список использованных источников:** 1. *Кремнев Г.П., Коновалов И.П., и др.* Прогрессивные методы получения заготовок из листового проката в машиностроении (Кремнев Г.П., Коновалов И.П., Наддачин В.Б., Коновалова Л.В., Дикаева В.Н.) Уч. пособие.- Одесса: Печатный дом. 2016.- 48 с. 2. *Некрасов Е.Н.* Компьютерные технологии в машиностроении. Одесса, Наука и Техника, 2005. -164 с. 3. *Старец А.С., Чесноков В. В.* Принципы определения структуры технологических процессов при автоматизированном проектировании. Информ. листок ОЦНТИ. - Одесса, 1984. – 4 с. 4. *Старец А.С. и др.* Повышение гибкости производства за счет автоматизации технологического проектирования. Сер. ХМ-15. Обзорная информация. М.: ЦИНТИхимнефтемаш, 1985. - 36 с. 5. *Коновалов И.* Раскрой - это очень просто! //САПР и Графика, №11, 2002. - С. 36-39. 6. *Коновалов И., Рыбка А.* Технологическая картография. Раскрой листовых материалов в машиностроении. //Деньги и Технологии, №2, 2003. – С. 40-43. 7. *Коновалов И.П., Мороз А.Г.* Эффективные методы технологической подготовки заготовительного производства. // Мир Техники и Технологий №5, 2007. – С. 36-38. 8. *Коновалов И.П.* САПР «Интех-Раскрой» в развитии. Профессиональные решения для листообработки. // Оборудование и инструмент для профессионалов, №6, 2012. – 18 с. 9. *Коновалов И.П.* Интех-Раскрой-Команда. // Оборудование и инструмент для профессионалов, №5, 2014. – 82 с.

**Bibliography (transliterated):** 1. *Kremnev G.P., Kononov I.P., i dr.* Progressivnye metody poluchenija zagotovok iz listovogo prokata v mashinostroenii (*Kremnev G.P., Kononov I.P., Naddachin V.B., Kononova L.V., Dikaeva V.N.*) Uch. posobie.- Odessa: Pechatnyj dom. 2016.- 48 s. 2. *Nekrasov E.N.* Komp'yuternye tehnologii v mashinostroenii. Odessa, Nauka i Tehnika, 2005. -164 s. 3. *Starets A.S., Chesnokov V. V.* Principy opredelenija struktury tehnologicheskikh processov pri avtomatizirovannom proektirovanii. Inform. listok OCNTI. - Odessa, 1984. – 4 s. 4. *Starets A.S. i dr.* Povyshenie gibkosti proizvodstva za schet avtomatizacii tehnologicheskogo proektirovanija. Ser. HM-15. Obzornaja informacija. M.: CINTIhimneftemash, 1985. - 36 s. 5. *Kononov I.* Raskroj - jeto ochen' prosto! //SAPR i Grafika, №11, 2002. - S. 36-39. 6. *Kononov I., Rybka A.* Tehnologicheskaja kartografija. Raskroj listovyh materialov v mashinostroenii. //Den'gi i Tehnologii, №2, 2003. - S. 40-43. 7. *Kononov I.P., Moroz A.G.* Jefferktivnye metody tehnologicheskoy podgotovki zagotovitel'nogo proizvodstva. // Mir Tehniki i Tehnologij №5, 2007. - S. 36-38. 8. *Kononov I.P.* SAPR «Inteh-Raskroj» v razvitii. Professional'nye reshenija dlja listoobrabotki. // Oborudovanie i instrument dlja professionalov, №6, 2012. – 18 s. 9. *Kononov I.P.* Inteh-Raskroj-Komanda. // Oborudovanie i instrument dlja professionalov, №5, 2014. – 82 s.